

早稲田大学理工学部 学生会員 三木陽介
早稲田大学理工学部 正会員 遠藤郁夫
東京都 正会員 鈴木 章

1.はじめに

下水汚泥の管路輸送による長距離輸送では、一般的には Hazen・Williams の修正式を用いて汚泥濃度、汚泥温度、及び管の経年変化等を勘案して摩擦損失水頭を求める。しかしながら、摩擦損失水頭の算定において Hazen・Williams の係数 C_H の影響は極めて大きいにも拘わらず、経験的配慮が必要であり、 C_H の合理的決定は、しばしば困難である。一方、当研究室では、下水汚泥が非ニュートン流体で、しかも流動特性は擬塑性流体(1500mgTS/l 以上)であることに着目して、Dodge および Metzner らが、CMC 或いは粘土スラリー等溶液性擬塑性流体について導いた式に対して、下水汚泥に適用するために、実験的に諸係数を決定し、非ニュートン流体としての下水汚泥に関して、摩擦損失係数を求めることができた。この論文は、下水処理場において、実際に運転している送泥管の圧力損失を測定して、Hazen・Williams の修正式と、当研究室で誘導した Dodge および Metzner らの式の下水汚泥適用修正式(以下、D-M 修正式)および粗滑誘導式等を用いて、比較検討を加えたものである。

2.調査方法

実際の送泥管路の圧力損失の測定は、ポンプの吐出口において 15 分間隔で測定した。汚泥濃度は 30 分間隔とした。測定時間は汚泥が送泥地点に到達すると考えられる時間に若干の余裕を考慮して 5 時間行った。また、実際の汚泥輸送管路の例を表-1 に示した。

3.調査結果と考察

3.1 Hazen・Williams の修正式

下水汚泥の摩擦損失水頭の計算方法として、乱流領域では Hazen・Williams の修正式がある。

$$H_L = 6.82 C_H \cdot 1.85 \cdot D^{-1.17} \cdot V^{1.85} \cdot L \cdot (1 + 0.11 C') \quad (1) \quad C' = \{1 - 0.019(T - 10)\}^{0.37} \cdot C_T \quad (2)$$

C' : 汚泥の液温 10°C におけるみかけの濃度(%) C_T : 汚泥の液温 $T^\circ\text{C}$ におけるみかけの濃度(%)

(1)式において、 C_H は前述したように、損失水頭に大きな影響を与えるにも拘わらず、管の経年変化を考慮して経験的に $C_H = 110$ を用いることが多い。

3.2 滑らかな管(D-M 修正式)、粗い管および粗滑遷移式

下水汚泥の層流領域より、下水汚泥濃度 C と構造粘度指数 n および擬塑性粘度係数 $K_p(=8 \cdot 10^{-1} \cdot k)$ との関係を実験的に求めた。また、乱流領域より、滑管、粗管および粗滑遷移領域における Re_G と f との関係求めた。

(1) 下水汚泥濃度 C と n との関係 (層流領域)

ニュートン流体: $C \leq 1500 \text{mgTS/l}$ $n = 1$ (8)

非ニュートン流体: $C \geq 1500 \text{mgTS/l}$ $n = 7.15 \times C^{-0.270}$ (9)

(2) 下水汚泥濃度 C と K_p との関係 (層流領域)

$$C \geq 2500 \text{mgTS/l} \quad K_p = 2.49 \times 10^{-8} \cdot C^{1.72} \quad (10)$$

$$C = 1500 \sim 2500 \text{mgTS/l, 遷移領域,} \quad C \leq 1500 \text{mgTS/l} \quad K_p = 0.01 \quad (11)$$

表 1 実際の汚泥輸送管路の例

下水処理場	A (青洲)	B (雑色)	S (芝罘)	X (嘉祥)
使用年数	1(1986.4~)	33(1964~)	24(1972~)	5(1981.10~)
全長(m)	35	42	40	25
平均流速(m/s)	0.561	0.885	0.813	0.688
汚泥ポンプ稼働状況	間欠運転	連続運転	連続運転	連続運転
平均流速	2~1.5m/day	55433	17978	26217
平均汚泥濃度(mg/l)	3500	8216	11333	8207
汚泥の種類	混合汚泥	混合汚泥	混合汚泥	混合汚泥
管種	ダクタイル鉄管	ダクタイル鉄管	鋼管	鋼管
管径(mm)	7700	10614	10500	3515
管径(mm)	250	350	350	400
粗度係数(絶対値)	0.0012	0.000857	0.000131	0.00075

汚泥輸送、汚泥管路輸送、汚泥処理・処分

〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1 TEL 03-3209-3211(内)3517

(3)滑らかな管 $3000 \sim 4000 < C \leq 15000 \text{ mgTS/l}$
 $1/\sqrt{f} = 1.85 \log(\text{Re}_G \cdot f^{1-n/2}) + 1.66 \times 10^{-4} \cdot C - 0.636$ (12)

(4)粗い管、 $\text{Re}_G \geq 30000$ $1/\sqrt{f} = 1.75 - 1.73 \log \frac{2k}{D}$ (13)

(5)粗滑遷移式 $3000 \sim 4000 < C \leq 15000 \text{ mgTS/l}$
 $1/\sqrt{f} = 1.75 - 1.73 \log \left\{ \frac{23.9 \times 0.99979^C}{(\text{Re}_G \cdot f^{1-n/2})^{1.07}} + \frac{2k}{D} \right\}$ (14)

3.3 実際の汚泥輸送管路における摩擦損失水頭の解析

(1)摩擦損失水頭の算定 損失水頭は下水処理場のポンプ吐出口と下水処理場の汚泥貯留槽の越流水面との間にベルヌーイ式を適用して求めた。 $L/D > 3000$ であることから、漸拡および曲がり等の諸損失を無視することとした。

(2)摩擦損失水頭の解析 表-1におけるA下水処理場は、供用年数が1年未満で、しかも1日当たりの送泥時間が2～2.5時間であったため、経年変化をほとんど無視できるものと考えられ、ダクタイル鋳鉄・モルタルライニング管の相対粗度 $k/D = 0.0012$ ($k = 0.3 \text{ mm}$)とし、粗滑遷移式による H_L -曲線を図-1に示した。また、S処理場では使用年数29年であるが、が並列で、1年間隔の間欠運転(休送泥管は水封)のため、相対粗度 $k/D = 0.000131$ 粗滑遷移式による H_L -曲線を図-2に示した。OおよびS処理場とも実測値とよく一致していることが認められた。H-W修正式($C_H = 110$)による H_L -曲線は、図-1では16.2%、

図-2では35%それぞれ過大値であった。また、H-W修正式($k/D = 0.0012, C_H = 123$)で求めると、15.7%過小値であった。図-3は、O下水処理場における流速と摩擦損失水頭との関係である。実測した圧力損失から(14)式を用いて H_L -曲線を求めた。O下水処理場の送泥管路は供用年数33年間で、しかも連続送泥を行っている。経年変化が大きく影響していることが認められた。前述のことから、粗滑遷移式計算値を実際の値と考えることができるから、33年間の経年変化で、 $H_L = 42 \text{ m}$ となった。すなわち、31%増加したことになる。H-W修正式($C_H = 110$)では、13.5%の増加となり、非常に過小評価となる。また、H-W修正式($C_H = 110$)では経年変化の H_L を合理的に推定することは困難であることが認められる。汚泥の管路輸送の流速は一般に $1.0 \sim 1.5 \text{ m/sec}$ の範囲を標準としているが、長距離の場合は H_L の関係で 1.0 m/sec 程度と考えられているが、設計時の流速 $V = 1.5 \text{ m/sec}$ とすると、粗滑遷移式による摩擦損失水頭 $H_L = 86 \text{ m}$ となる。安全率 $F = 1.5$ とすれば $H_L = 129 \text{ m}$ となる。この場合は、経年変化により33年後の粗滑遷移式による H_L は 117 m となる。すなわち、33年後の安全率 $F_{33} = 1.1$ となる。また、33年後も安全率 $F = 1.5$ であるための流速 $V_{33} = 1.28 \text{ m/sec}$ となる。もし、 $V = 1.0 \text{ m/sec}$ で送泥するとすれば $F = 2.5$ すなわち、2.5倍の安全率が確保されることになる。

4. 総括および結論 実際の汚泥輸送管路の圧力損失を測定し、摩擦損失水頭を計算した。また、経年変化に伴う損失水頭の増加についても検討を加え、汚泥輸送管路の損失水頭に関する安全率についても2、3の知見を得ることができた。今回はA、SおよびO下水処理場について数回の調査結果の解析であり、甚だ不十分であるが、今後、更に多くの事例について調査解析を試みるつもりである。

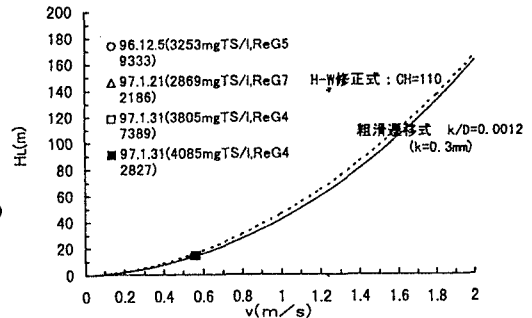


図1 A下水処理場の流速と損失水頭

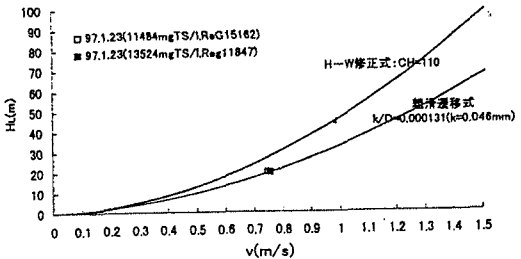


図2 S下水処理場の流速と損失水頭

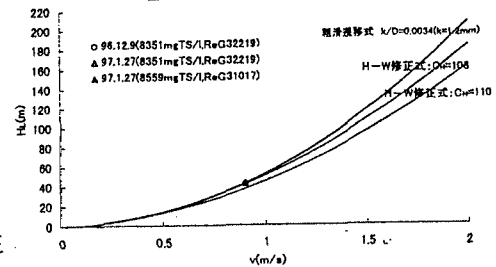


図3 O下水処理場の流速と損失水頭